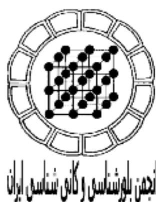
مجله
بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و سوم، شماره‌ی اول، بهار ۹۴، از صفحهٔ ۶۳ تا ۷۴



سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی و سنگ‌زایی اسکارن‌های کوه صاحب الزمان کرمان

حسین معین وزیری*[۱]، سلیمه دهقانی[۱]، علی خردمند[۲]

۱- دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی
۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه کرمان

(دریافت مقاله: ۹۲/۴/۲۴، نسخه نهایی: ۹۲/۱۰/۸)

چکیده: کوه صاحب‌الزمان در ۸ کیلومتری شرق شهرکرمان قرار دارد. در این نقطه یک توده‌ی گرانیتوئیدی به داخل سنگ‌های آهکی کرتاسه تزریق شده و موجب دگرگونی این سنگ‌ها شده است. به‌علت عدم فرسایش کافی و وجود آبرفت‌های کوهپایه‌ای، اسکارن و توده‌ی نفوذی بیرون زدگی‌های وسیع و بهم پیوسته ندارند بلکه به صورت توده‌هائی به قطر ۱۵ تا ۵۰ متر و دور از هم دیده می‌شوند. آرایش بیرون زدگی‌ها نشان می‌دهد که جایگزینی توده‌ی آذرین در جهت گسل‌های مهم منطقه و با روند شمالی- جنوبی صورت گرفته است. بررسی‌های سنگ نگاری نشان داده که توده آذرین دارای ترکیب دیوریتی تا مونزوسی‌ینیتی بوده و اسکارن از نوع کلسیکی است. کانی‌های اسکارن شامل ولاستونیت، دیوپسید، ایدوکراز، گارنت، اپیدوت ± کلریت ± کلسیت هستند. مقایسه‌ی ترکیب شیمیائی اسکارن با سنگ‌های آهکی دگرگون نشده‌ی همجوار نشان داد که علاوه بر انرژی گرمائی، مقادیر زیادی شاره‌های غنی از سیلیس توده‌ی آذرین به داخل سنگ‌های آهکی انتقال یافته بنابراین اسکارن از نوع تراوشی است. شدت دگرگونی در حد رخساره‌های آلبیت- اپیدوت هورنفلس تا هورنبلند هورنفلس است.

واژه‌های کلیدی: *اسکارن؛ دگرگونی؛ دگرنهادی؛ کرمان.*

مقدمه

منطقه‌ی مورد بررسی در حاشیه شرقی شهرکرمان (گستره‌ی ″۵۲´۷°۵۷ طول‌شرقی و ″۲۲´۱۷°۳۰ عرض شمالی) واقع شده و وسعتی حدود ۰/۱۵ کیلومترمربع را در بر می‌گیرد (شکل ۱). آسان‌ترین راه دسترسی، خیابان سعیدی- باباکمالی و سپس مسیر پارک جنگلی قائم است. واحدهای سنگی بیرون زده در این منطقه عبارتند از سنگ‌های آهکی با فاسیس‌ها و ضخامت‌های متفاوت که به دوره‌ی کرتاسه تعلق داشته و به طور دگرشیب به‌وسیله‌ی کنگلومرای کرمان به سن پالئوسن، پوشیده شده‌اند. در این منطقه یک توده‌ی نفوذی به سن سنوزوئیک به داخل سنگ‌های آهکی کرتاسه نفوذ کرده و هاله های نازک از اسکارن بدور بیرون زده‌های کوچک و پراکنده به‌وجود آورده است (شکل ۲). به‌علت نبود بیرون زدگی‌های کافی از اسکارن و توده‌ی نفوذی، تاکنون بررسی‌های چندانی روی اسکارن این منطقه انجام نگرفته و هدف از این پژوهش بررسی کانی‌شناسی اسکارن و واکنش‌های دگرگونی بین سنگ‌های آهکی و توده‌ی نفوذی است.

زمین‌شناسی منطقه

در اطراف کرمان فقط واحدهای رسوبی وابسته به کرتاسه دیده می‌شوند که اولین بار توسط [1] بررسی شده و از پائین به بالا، در آن ۶ واحد چینه‌ای تشخیص داده شد که عبارتند از: کنگلومرای قاعده‌ای به ضخامت ۱۵ متر با ناپیوستگی

* نویسنده مسئول، تلفن: ۲۲۱۴۴۷۳۵ (۰۲۱)، پست الکترونیکی: moinevaziri@yahoo.com

زاویه‌دار روی شیل‌های ژوراسیک و یا آهک‌های تریاس قرار دارد. روی کنگلومرای قاعده‌ای واحدی مرکب از ماسه سنگ‌های سرخ مایل به قهوه‌ای به‌ضخامت ۲۰ تا ۱۵۰ متر نشسته است. یک واحد دولومیت زردرنگ واحد ماسه‌سنگ را می‌پوشاند و به سمت بالا رفته رفته آهکی می‌شود. روی دولومیت، تناوبی از مارن و سنگ آهک به ضخامت ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر قرار گرفته که سن آن، براساس فسیل‌های موجود، آلبین تعیین شده است. روی مارن و آهک را طبقات متناوب ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک حاوی مرجان، آمونیت و اوربیتولین (احتمالاً آلبین) به ضخامت ۸۰ متر می‌پوشاند. آخرین طبقه در بالا آهک توده‌ای حاوی اوربیتولین است که به سنونین تعلق دارد و دارای ۳۰۰ متر ضخامت است. با توجه به بررسی‌های چینه‌شناسی، ضخامت واحدهای کرتاسه در کرمان حدود ۸۴۰ متر برآورد می‌شود.

در کوه صاحب‌الزمان (شکل۲) یک توده‌ی آذرین متشکل از کوارتزدیوریت، دیوریت و مونزونیت به قاعده‌ی کرتاسه تزریق شده است. این توده کاملاً بیرون زده نشده بلکه به صورت نفوذی‌های انگشتی به قطر ۱۵ تا ۵۰ متر دیده می‌شود و هر بیرون زدگی در اطراف خود هاله‌ای از اسکارن به وجود آورده است. به نظر می‌رسد که توده‌ی آذرین در راستای گسل‌های بیشتر منطقه با روند شمالی- جنوبی جایگزین شده است. وجود آبرفت‌های کوهپایه و رسوب‌های جوان مانع از مشاهده‌ی بیرون زدگی کامل توده‌ی آذرین و هاله‌های اسکارن در بخش‌های فرسایش یافته است.



شکل ۱ عکس ماهواره‌ای کوه صاحب الزمان. بیرون زدگی اسکارن و توده‌ی نفوذی در حاشیه‌ی شرقی کرمان قرار دارد (دید به طرف شمال شرق).



شکل ۲ سنگ‌های آهکی کوه صاحب الزمان که توده‌ی نفوذی به داخل آن‌ها تزریق شده است.

روش بررسی

پس از شناسائی صحرائی و ثبت مختصات جغرافیائی محل بررسی برای تهیه‌ی نقشه‌ی زمین‌شناسی کرمان با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ اقدام شد. در این نوشته از داده‌های چینه‌شناسی، سنگ‌شناسی و زمین ساخت این نقشه استفاده و سعی شده تا از امکانات آزمایشگاهی و بودجه‌ی تحقیقاتی ناچیز فقط برای بررسی هاله‌ی دگرگونی استفاده شود. برای این منظور، در مسافرت دوم نمونه برداری صورت گرفت. در نمونه برداری سعی شد تا نمونه‌های سالم و متنوع از توده‌ی نفوذی و اسکارن برداشت شود. نمونه‌های اسکارن، باتوجه به فاصله از مرکز گرمایی برداشت شده‌اند بدین ترتیب که اولین نمونه درست از محل تماس و آخرین آن از خارجی ترین بخش هاله‌ی دگرگونی گرفته شدند. به منظور درک مبادلات شیمیائی بین توده‌ی آذرین و سنگ‌های آهکی اطراف، لازم بود که شیمی سنگ‌های آهکی دگرگون نشده‌ی آن محل با نمونه‌های اسکارن مقایسه شود به همین منظور کمی دورتر از بیرون زدگی‌های آذرین، از سنگ آهک مجاور نیز نمونه برداری به عمل آمد. پس از بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی نمونه‌ها به‌وسیله‌ی میکروسکوپ قطبشی، سه نمونه سنگ آذرین، پنج نمونه اسکارن و یک نمونه سنگ آهک دگرگون نشده آن محل، مورد تجزیه شیمیائی قرار گرفتند (جدول ۱). آنالیزها در آزمایشگاه ژئوشیمی گروه زمین‌شناسی دانشگاه خوارزمی و به روش XRF انجام گرفتند. نتایج بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، در نوشتار تقدیم خوانندگان گرامی می‌شود.

سنگ نگاری توده‌ی نفوذی

هر چند موضوع این نوشتار معرفی اسکارن کوه صاحب الزمان کرمان است اما چون لازمه‌ی تشکیل اسکارن امکان مبادله مادی و انرژی بین یک توده‌ی آذرین داغ و سنگ‌های آهکی اطراف است؛ بنابراین مختصری درباره‌ی توده آذرین کوه صاحب الزمان نیز صحبت خواهیم کرد.

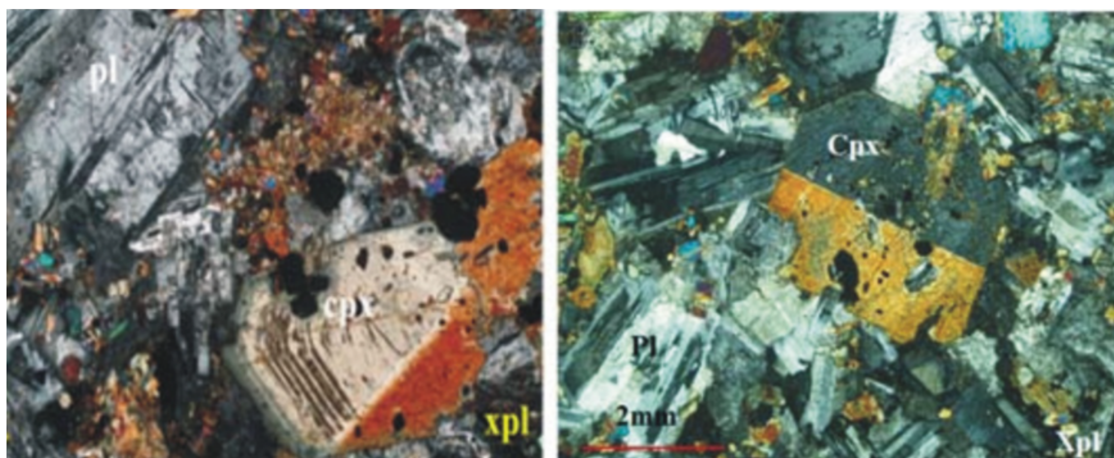
چنانکه در بالا اشاره شد یک توده‌ی آذرین شامل مونزوسی‌ینیت، مونزونیت، مونزودیوریت، کوارتزدیوریت و دیوریت به صورت شبه آتشفشانی به زیر آهک‌های کرتاسه تزریق شده است.

دیوریت و کوارتز دیوریت دارای ساخت و بافت پورفیروئید بوده و روی نمونه ماکروسکوپی آن‌ها بلورهای پیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز با چشم غیرمسلح دیده می‌شوند. در زیر میکروسکوپ، بلورهای درشت آمفیبول و میکروفنوکریستال‌های پلاژیوکلاز در خمیره‌ای هولوکریستالین متشکل از پلاژیوکلاز، آمفیبول، کلینوپیروکسن، مختصری کوارتز، اپیدوت، اسفن، کلریت و مگنتیت دیده می‌شوند (شکل۳). اپیدوت و کلریت کانی‌های ثانویه هستند [۲].

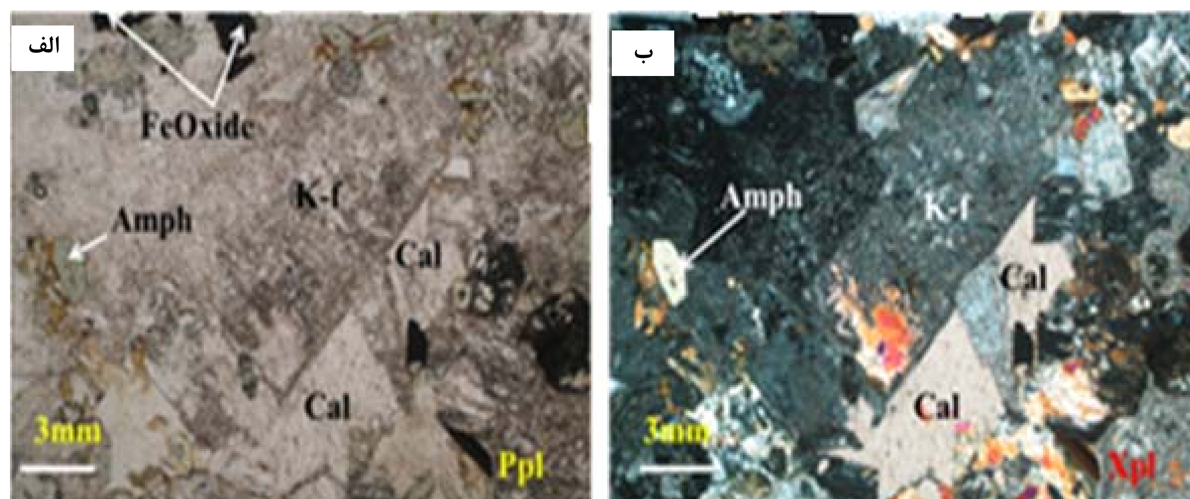
مونزودیوریت، مونزونیت و مونزوسینیت، در نمونه دستی، با دیوریت و کوارتز دیوریت تفاوتی ندارند. این سنگ‌ها نیز دارای ساخت و بافت دانه‌ای بوده کانی‌های بیشتر آن‌ها عبارتند از پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، اورتوز پرتیتی و آمفیبول. کانی‌های ثانوی کلریت و سریسیت هستند [۲]. درصدی از ارتوز (ارتوکلاز) از مونزودیوریت نیز به سوی مونزونیت و مونزوسیینیت افزایش یابد (شکل۴).

جدول ۱ نتایج تجزیه‌ی شیمیائی تعدادی از نمونه‌های اسکارن (S4، S6، S15، S19، S23)، سنگ آذرین (S1، S16، S20) و یک نمونه آهک دگرگون نشدهِ همان محل (S2).

	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	SrO	SO_3	LOI
S2	۱۰/۷۵	۲/۱۱	۵۳/۸۵	۱/۳۸	۱/۳۹	۰/۳۳	۰/۱۳	۰	۰	۰/۱۱	۰/۲۰	۲۹/۷۴
S4	۴۳/۸۹	۷/۱۷	۲۹/۴۸	۳/۶۹	۶/۰۸	۲/۵۳	۰	۰/۴۸	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۱۱	۶/۳۴
S6	۳۹/۸۵	۷/۱۵	۲۵/۸۸	۳/۳۳	۶/۰۸	۲/۸۵	۰/۲۰	۰/۴۸	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۱۶	۱۳/۸۴
S15	۳۷/۹۵	۷/۷۱	۴۱/۶۵	۶/۱۴	۲/۱۲	۰	۰	۰/۶۴	۰/۱۷	۰	۰/۲۹	۳/۳۳
S19	۳۳/۱۴	۱۲/۳۴	۴۲/۶۱	۳/۹۲	۵/۲۵	۰	۰	۰	۰	۰/۰۹	۳/۱۴	۳/۶۹
S23	۲۵/۹۳	۱۲/۵۰	۳۳/۶۹	۸/۸۷	۳/۷۹	۱/۴۴	۰	۰/۷۹	۰/۳۱	۰/۰۹	۰/۲۳	۸/۸۷
S.1	۵۹/۴۷	۱۵/۱۷	۱۲/۰۸	۳/۶۹	۱/۵۲	۲/۵۲	۳/۶۷	۰/۵۴	۰/۲۲	۰	۰	۰
S16	۵۴/۸۱	۱۳/۹۸	۱۵/۳۳	۶/۱۳	۲/۰۶	۲/۱۹	۴/۲۱	۰/۳۶	۰/۲۹	۰	۰	۰
S20	۶۲/۰	۱۲/۳۸	۷/۸۴	۷/۷۷	۰/۵۹	۲/۳۶	۲/۸۶	۰/۸۹	۰/۲۴	۰	۰	۰



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی دیوریت (سمت چپ) و کوارتزدیوریت (سمت راست). فنوکریست‌های کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در خمیره‌ای متشکل از میکروفنوکریست های این دو کانی. بلورهای ریز کوارتز نیز در خمیره‌ی سنگ دیده می‌شوند.



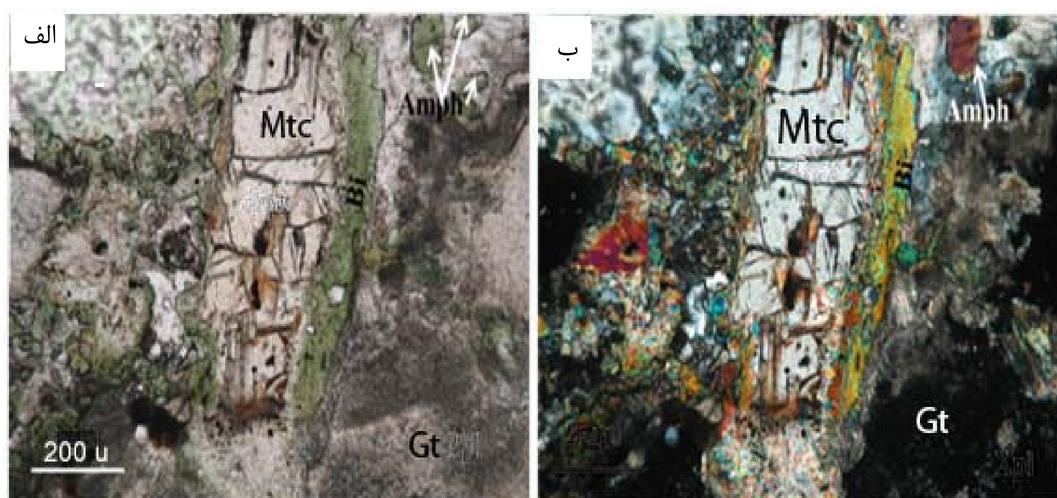
شکل ۴ تصویر یک نمونه مونزوسی‌ینیت متشکل از ارتوزپرتیتی، پلاژیوکلاز، آمفیبول، اکسیدآهن و کلسیت. کلسیت محصول دگرثانی است.

در نمونه‌های برداشت شده از برخوردگاه، بلورهای درشت مونتی‌سلیت که به‌وسیله‌ی بیوتیت و کلریت دگرنهادی سبز رنگ احاطه شده‌اند، مشاهده شدند (شکل ۵). مونتی‌سلیت از روی خاموشی مستقیم، دوشکستی ضعیف و برجستگی قوی و نیز با استفاده از پلاتین تئودولیت و اندازه‌گیری زاویه‌ی $2v\alpha$ که برابر با ۷۳ تا ۷۵ درجه بود، تشخیص داده شده است[۲].

سنگ‌نگاری اسکارن‌های منطقه

به منظور بررسی سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی اسکارن‌های کوه صاحب‌الزمان تعداد ۱۵ نمونه از بیرن زدگی‌ها برداشت شدند. از تمام نمونه‌ها مقطع نازک تهیه شد و از ۵ نمونه اسکارن، یک نمونه سنگ آهکی دگرگون نشده مجاور اسکارن آنالیز شیمیائی به روش XRF به عمل آمد. همچنین در مؤسسه تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تعدادی از کانی‌های اسکارن با ریزپردازنده‌ی الکترونی تجزیه شیمیائی شدند.

براساس بررسی‌های میکروسکوپی، اسکارن‌های کوه صاحب‌الزمان کرمان به ۶ نوع زیر تقسیم می‌شوند که به ترتیب افزایش نسبی شدت دگرگونی عبارتنداز:۱- کلریت-اپیدوت-گارنت اسکارن، ۲- ایدوکراز-گارنت اسکارن، ۳- ایدوکراز اسکارن، ۴- گارنت-ولاستونیت اسکارن، ۵- دیوپسید-ایدوکراز- ولاستونیت اسکارن، ۶- دیوپسید- ولاستونیت-گارنت اسکارن. مشاهده‌ی مرزهای تیز بین رخساره‌های مختلف اسکارن (شکل ۶) از خاستگاه تراوشی آن حکایت می‌کند.



شکل ۵ تبلور درشت بلورهای مونتی‌سلیت (Mtc) در تماس ماگما با گارنت اسکارن. حاشیه مونتی‌سلیت به آمفیبول سبز و بیوتیت تبدیل شده است. الف: بدون آنالیزور (PPL)، ب: با آنالیزور (XPL).



شکل ۶ تصویر ماکروسکوپی سه نمونه اسکارن کوه صاحب الزمان کرمان.

اپیدوت – گارنت اسکارن: نمونه‌ی دستی این سنگ، به دلیل وجود اپیدوت، به رنگ سبزروشن دیده می‌شود. کانی‌های سازنده‌ی آن با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نیستند. بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که بافت این سنگ پوئی‌کیلوبلاستیک بوده از گارنت، کلسیت، اپیدوت و به مقدار کم کلریت، کوارتز، ولاستونیت، اکتینولیت- ترمولیت ساخته شده است.

ایدوکراز – گارنت اسکارن: این سنگ در نمونه‌ی دستی به رنگ خاکستری متمایل به سبز است. بلورهای پسته‌ای رنگ ایدوکراز و دانه‌های قهوه‌ای‌رنگ گارنت با چشم غیرمسلح دیده می‌شوند. در مقاطع میکروسکوپی بافت آن‌ها دانه ای یا پوئی-کیلوبلاستیک بوده به ترتیب فراوانی، شامل گارنت، کلسیت، ایدوکرازو کلریت هستند. اپیدوت نیز به مقدار کم و به صورت ریزبلور وجود دارد.

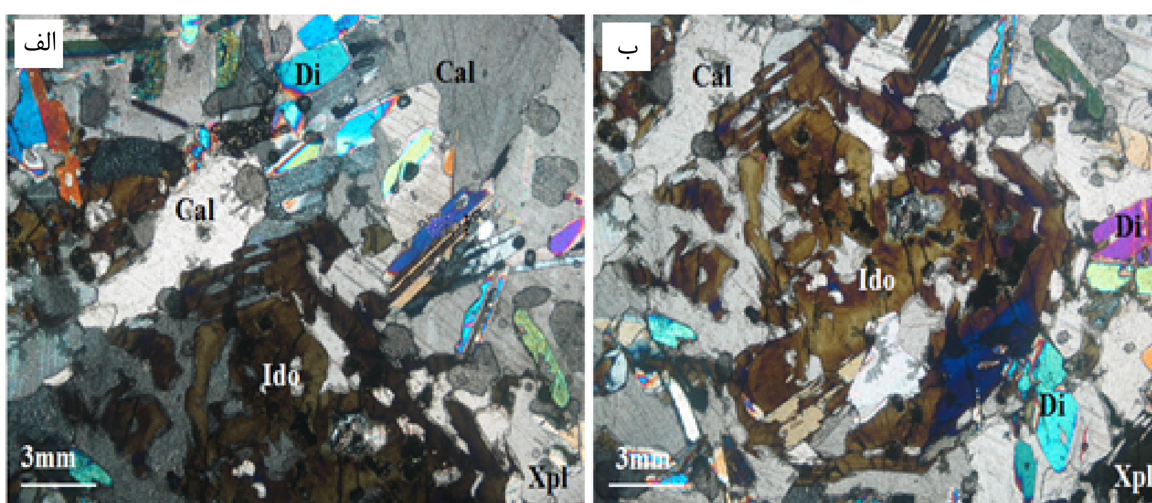
ایدوکراز اسکارن: در نمونه دستی، ایدوکراز اسکارن به رنگ پسته‌ای دیده می‌شود. در مقطع میکروسکوپی، فراوان‌ترین کانی‌ها ایدوکراز و کلسیت هستند. مقدار کمی گارنت و دیوپسید هم در این سنگ وجود دارد.

گارنت – ولاستونیت اسکارن: در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن دیده می‌شود. در این سنگ‌ها دانه‌های

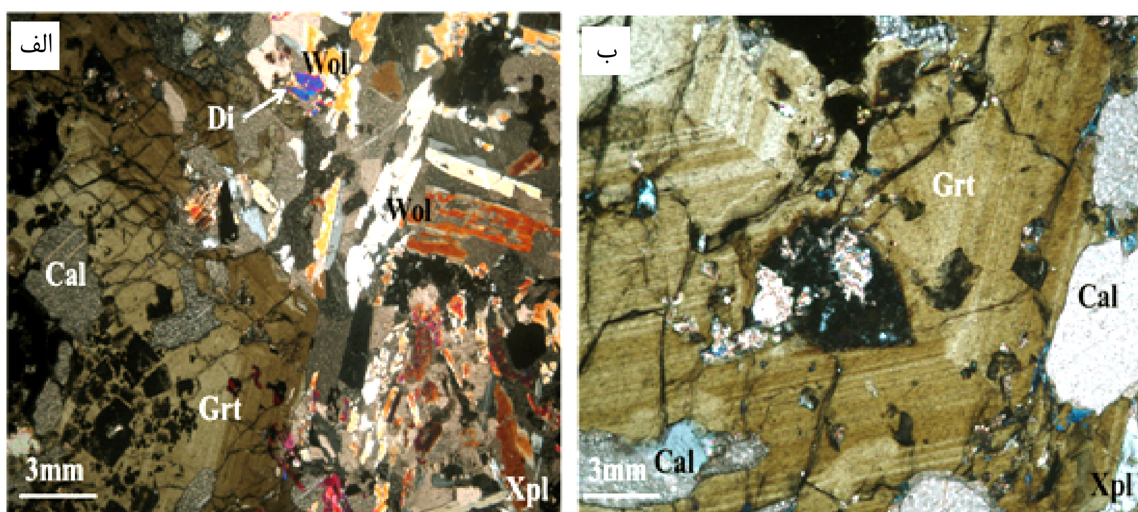
قهوه‌ای گارنت با چشم غیرمسلح دیده می‌شود. در مقطع میکروسکوپی کانی‌های تشکیل‌دهنده، به ترتیب فراوانی، عبارتنداز: ولاستونیت، گارنت و کلسیت که همراهند با مختصری اپیدوت.

ایدوکراز - دیوپسید - ولاستونیت اسکارن: در نمونه‌ی دستی به رنگ خاکستری است که روی آن بلورهای پسته‌ای‌رنگ ایدوکراز مشاهده می‌شوند. در زیر میکروسکوپ، کانی‌های سازنده‌ی این سنگ، به ترتیب فراوانی، عبارتند از کلسیت، ولاستونیت، ایدوکراز و دیوپسید (شکل ۷). مقدار کمی گارنت و اپیدوت نیز در این سنگ دیده می‌شوند.

دیوپسید– ولاستونیت - گارنت اسکارن: این نمونه از محل برخورد اسکارن با سنگ آذرین برداشت شده و به رنگ خاکستری با لکه‌های قهوه‌ای تیره که بلورهای گارنت هستند، دیده می‌شود. در زیر میکروسکوپ، کانی‌های اصلی این سنگ عبارتند از گارنت، کلسیت، ولاستونیت و دیوپسید (شکل۸). مقدار کمی بلورهای اپیدوت نیز در این سنگ مشاهده می‌شود.



شکل ۷ الف و ب تصویر میکروسکوپی زوئیزیت- ایدوکراز- دیوپسید اسکارن. کلسیت به عنوان عضو واکنش کننده‌ی اضافی و باقیمانده از واکنش محسوب می‌شود. در XPL ایدوکراز به رنگ بنفش مایل به آبی (دوشکستی غیرعادی)، دیوپسید با رنگ اینترفرانس آبی یا بنفش مایل به قرمز دیده می‌شود.



شکل ۸ الف تصویر میکروسکوپی گارنت- دیوپسید- ولاستونیت اسکارن و ب : کلسیت- گارنت اسکارن. بلورهای درشت گروسولر دارای ساخت منطقه‌ای و دوشکستی ضعیف هستند. کلسیت عضو واکنش کننده‌ی و باقیمانده از واکنش است.

از مقایسه‌ی نمونه‌های اسکارن با هم، نتیجه می‌گیریم که هرگاه در یک نمونه، ایدوکراز ظاهر می‌شود، گارنت و دیوپسید ناپدید می‌شوند و یا مقدار آنها ناچیز است. این امر نشان می‌دهد که در واکنش تبلور ایدوکراز، گارنت و دیوپسید اعضای شرکت کننده در واکنش هستند.

براساس داده‌های سنگ نگاری دو رخساره آلبیت- اپیدوت- هورنفلس و هورنبلندهورنفلس در اسکارن‌های کرمان مشاهده شده‌اند. مجموعه کانیایی ولاستونیت- دیوپسید- گارنت را می‌توان به رخساره هورنبلندهورنفلس نسبت داد و مجموعه کانیایی کلریت - اپیدوت- ایدوکراز را در ردیف رخساره آلبیت- اپیدوت‌هورنفلس به حساب آورد.

کانی‌شناسی اسکارن‌های کوه صاحب الزمان

کانی‌های اسکارن کوه صاحب الزمان، به ترتیب تقدم در تبلور دگرگونی، عبارتنداز: اپیدوت، گارنت، دیوپسید، ولاستونیت، ایدوکراز، کلریت و کوارتز. واضح است که همه این کانی‌ها در یک سنگ حضور ندارند.

اپیدوت: این کانی زوئیزیت است که به صورت بلورهای ریز حدود ۱۰ تا ۳۵ درصد سنگ را می‌سازد. این کانی در نورعادی دارای برجستگی بالا بوده، بی‌رنگ یا به رنگ سبز مایل به زرد مشاهده می‌گردد. بیرفرنژانس اپیدوت در بخش‌های مختلف بلور متفاوت است و از خاکستری مایل به آبی تا زرد تغییر می‌کند. دو نسل اپیدوت در این سنگ‌ها دیده می‌شود: اپیدوت نسل اول در داخل بلورهای درشت گارنت با بافت پوئی کیلوبلاستیک دیده می‌شود و گارنت در خارج این کانی ساخته شده است. اپیدوت نسل دوم حاصل دگرگونی برگشتی بوده و درحاشیه یا در بین کانی‌های قبلی به وجود آمده است.

گارنت: این کانی، به صورت ریزبلور (در تماس با توده آذرین) یا درشت بلور(دور از توده آذرین)، اتومورف یا گزنومورف، دیده می‌شود. دربعضی موارد ۴۰ درصد از حجم سنگ را می‌سازد. بلورهای ریز گارنت ایزوتروپ هستند اما حاشیه بلورهای درشت ان‌ایزوتروپ بوده مختصری بیرفرنژانس و زون‌بندی نشان می‌دهند. گارنت‌های آنالیز شده اسکارن کوه صاحب الزمان کرمان ترکیب گروسولر- آندرادیت دارند (جدول۲).

جدول ۲ نتایج تجزیه‌ی شیمیائی چند نمونه اسکارن کوه صاحب الزمان کرمان.

	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	TiO_2
S11	۳۷٫۸۶	۱۰٫۶۹	۳۳٫۸۵	۰٫۰۷	۱۵٫۹۵	۰٫۱۹
	۳۸٫۳۶	۱۰٫۹۰	۳۳٫۸۸	۰٫۰۷	۱۶٫۹۳	۰٫۲۲
	۳۷٫۸	۸٫۸۹	۳۳٫۴۸	۰٫۰۳	۱۸٫۷۷	۰٫۲۹
S17	۳۸٫۰۹	۱۷٫۰۵	۳۳٫۶۹	۰٫۴۷	۷٫۶۶	۱٫۰۴
	۳۷٫۹	۱۶٫۸۵	۳۳٫۶۱	۰٫۴	۸٫۱۱	۰٫۴۴
	۳۷٫۶۲	۱۶٫۵۱	۳۲٫۹۴	۰٫۴۵	۱۰٫۲۳	۰٫۹۲
کاتیون‌ها برمبنای ۱۲ اتم اکسیژن و درصد اعضاء نهایی						
Cations	Si	AlVI	Ca	Mg	Fe^{+2}	Ti
S11	۳٫۰۲	۱٫۰۰۷	۲٫۸۹	۰٫۰۰۸	۰٫۱۳۳	۰٫۰۱۱
	۳٫۰۱	۱٫۰۰۸	۲٫۸۵	۰٫۰۰۸	۰٫۱۷۰	۰٫۰۱۳
	۳٫۰۲	۰٫۸۳۷	۲٫۸۷	۰٫۰۰۴	۰٫۱۷۱	۰٫۰۱۷
S17	۲٫۹۹	۱٫۵۷۵	۲٫۸۳	۰٫۰۵۵	۰٫۱۷۰	۰٫۰۶۱
	۲٫۹۸	۱٫۵۸۱	۲٫۸۳	۰٫۰۴۷	۰٫۱۳۲	۰٫۰۲۶
	۲٫۹۴	۱٫۵۲۴	۲٫۷۶	۰٫۰۵۲	۰٫۱۸۸	۰٫۰۵۴
	S11-1	S11-2	S11-3	S17-1	S17-2	S17-3
Gross %	۴۷٫۵۳	۴۶٫۱۱	۳۸٫۳۴	۷۵٫۵۷	۷۳٫۸۷	۶۷٫۹۱
And %	۴۷٫۸۳	۴۷٫۹۹	۵۵٫۹۳	۱۷٫۱۴	۲۰٫۱۷	۲۴٫۰۶
Alm %	۴٫۳۷	۵٫۶۰	۵٫۶۱	۵٫۴۹	۴٫۴۰	۶٫۲۷
Pyr %	۰٫۲۷	۰٫۲۷	۰٫۱۲	۱٫۸	۱٫۵۶	۱٫۷۵
	آندرادیت			گروسولر		

دیوپسید: این کانی به صورت ساب‌اتومورف یا اتومورف و دارای ماکل تکراری به موازات سطح (100) دیده می‌شود. بیرفرنژانس آن در گستره‌ی سفید تا زرد سری اول یا آبی سری دوم است. دیوپسید ۵ تا ۲۰ درصد سنگ را می‌سازد.

ولاستونیت: این کانی به مقدار کم در اسکارن‌ها وجود دارد. تیغه‌های ولاستونیت دارای بیرفرنژانس ضعیف (سفید تا نارنجی سری اول) و دو محوری منفی است.

ایدوکراز: این کانی در نورعادی بی‌رنگ و یا قهوه‌ای کمرنگ است. مانند گارنت برجستگی قوی دارد و در نور آنالیزه بیرفرنژانس غیرعادی (آبی تیره تا قهوه‌ای) از خود نشان می‌دهد. برخی بلورهای این کانی زوناسیون دارند. مقدار ایدوکراز در اسکارن‌ها از صفر تا ۶۵ درصد تغییر می‌کند.

ترمولیت - اکتینولیت: این کانی‌ها به شکل بلورهای سوزنی بسیار باریک به مقدار کم در این سنگ‌ها دیده می‌شود.

کلریت: در نورعادی سبز کمرنگ یا زرد و در نور آنالیزه بیرفرنژانس ضعیف از خود نشان می‌دهد. رنگ‌های تداخلی کلریت زرد تا نارنجی سری اول است.

کلسیت: کلسیت فراوان‌ترین کانی فرعی این سنگ‌ها است. بلورهای این کانی به صورت بی‌شکل در اطراف بلورهای ولاستونیت و یا به صورت ادخال در بلورهای گارنت، دیده می‌شود. برخی از بلورهای کلسیت، حاصل تجزیه کانی‌های قبلی هستند.

کوارتز: این کانی به مقدار کم در بعضی از اسکارن‌ها دیده می‌شود. وجود کوارتز همراه با کلسیت در این سنگ‌ها نشان‌دهنده این است که واکنش‌ها به‌طور کامل صورت نگرفته‌اند. علت توقف واکنش‌ها کافی نبودن دما و یا افزایش XCO_2 به‌سبب پیشرفت واکنش‌ها بوده است.

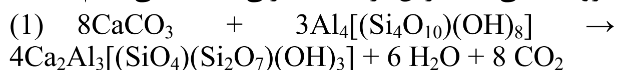
واکنش‌های دگرگونی تشکیل اسکارن در منطقه

در این مبحث واکنش‌های احتمالی تشکیل اپیدوت، گارنت، کلریت، ولاستونیت، دیوپسید و ایدوکراز که کانی‌های اصلی اسکارن این منطقه هستند مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این رابطه از شواهد سنگ نگاری و پاراژنزها برای انتخاب محتمل‌ترین واکنش‌ها استفاده شده است. بررسی‌های صحرائی و سنگ نگاری نشان داده که اختلاف ترکیب کانی‌شناسی این نمونه‌ها به علت دوری و نزدیکی از توده آذرین نیست بلکه تغییرات موضعی ترکیب شیمیائی پروتولیت، شدت و ضعف برشی شدگی در اطراف توده نفوذی و نرخ جریان سیالات و نیز میزان XCO_2 سبب تفاوت‌های کانی‌شناسی شده است.

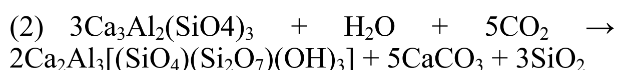
مقایسه ترکیب شیمیائی نمونه‌های اسکارن با ترکیب شیمیائی سنگ‌های آذرین و یک نمونه سنگ آهک دگرگون نشده از همان محل، نشان داده (شکل ۹ و ۱۰) که انتقال سیالات غنی‌ازسیلیس و آهن ازتوده آذرین به سمت سنگ درونگیر، عامل اصلی دگرنهادی بوده است. از نمودار شکل۱۰ چنین برداشت می‌شود که آلومین (به صورت کانی‌های رسی) و منیزیم (آهک دولومیتی) قبلاً در سنگ آهک وجود داشته است. آهن که در دماهای بالا متحرک و در دماهای پائین کم تحرک است، پس از انتشار توسط سیالات ماگمائی، در نقاط دورتر از توده نفوذی به صورت آندرادیت تثبیت شده است (شکل ۱۰). حضور گروسولر، دیوپسید و ولاستونیت در اسکارن نشان می‌دهد که سنگ اولیه، سنگ آهک مارنی مختصری دولومیتی بوده و اسکارن از نوع کلسیتی است.

در این اسکارن‌ها دو نسل گارنت، اپیدوت و کلریت دیده شده؛ گارنت، اپیدوت و کلریت نسل اول در ابتدای دگرگونی به‌وجود آمده‌اند؛ گارنت نسل دوم به خرج اپیدوت نسل اول و در طول دگرگونی پیشرونده متبلور شده است. اپیدوت و کلریت نسل دوم و همچنین ایدوکراز طی دگرگونی برگشتی، به‌علت افزایش فشار بخارآب در سنگ درونگیر، متبلور شده‌اند. همچنین، حضور اپیدوت و آندرادیت، نشانه گریزندگی بالای اکسیژن در زمان تشکیل این دوکانی است.

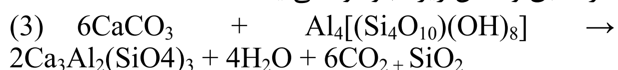
واکنش‌های احتمالی تشکیل اپیدوت: دراین اسکارن‌ها، اپیدوت از نوع زوئیزیت است که هم در دگرگونی پیشرونده و هم برگشتی تشکیل شده‌است. پیدایش زوئیزیت نسل اول را که بدور آن و به خرج آن، گروسولر متبلور شده به دگرگونی ایزوشیمیائی آهک رس‌دار (آهک مارنی) نسبت می‌دهیم:


(1) $8CaCO_3 + 3Al_4[(Si_4O_{10})(OH)_8] \rightarrow 4Ca_2Al_3[(SiO_4)(Si_2O_7)(OH)_3] + 6\,H_2O + 8\,CO_2$

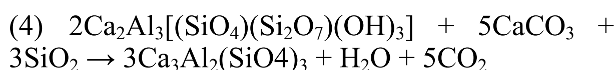
اپیدوت نسل دوم در زمانی که سیالات هیدروترمال غنی‌از آب به داخل اسکارن وارد شده از ناپایداری گروسولر به‌وجود آمده است :


(2) $3Ca_3Al_2(SiO4)_3 + H_2O + 5CO_2 \rightarrow 2Ca_2Al_3[(SiO_4)(Si_2O_7)(OH)_3] + 5CaCO_3 + 3SiO_2$

واکنش‌های احتمالی تشکیل گارنت: گارنت تقریباً در تمام نمونه‌های اسکارن منطقه حضور دارد. این کانی متعلق به سری اوگراندیت بوده، دارای ترکیب گروسولر و آندرادیت است. گروسولر نسل اول از دگرگونی ایزوشیمیائی سنگ آهک رس‌دار، طبق واکنش زیر، بوجود می‌آید :

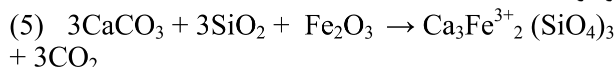

(3) $6CaCO_3 + Al_4[(Si_4O_{10})(OH)_8] \rightarrow 2Ca_3Al_2(SiO4)_3 + 4H_2O + 6CO_2 + SiO_2$

همانطورکه در مقاطع میکروسکوپی دیده شده گروسولر نسل دوم به خرج اپیدوت و احتمالاً طبق واکنش زیر متبلور شده است :



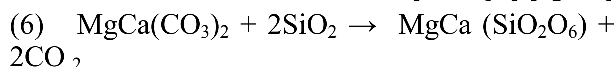
(4) $2Ca_2Al_3[(SiO_4)(Si_2O_7)(OH)_3] + 5CaCO_3 + 3SiO_2 \rightarrow 3Ca_3Al_2(SiO4)_3 + H_2O + 5CO_2$

آندرادیت به خرج آهن و سیلیس ماگما و کلسیم و آلومینیوم سنگ آهک، در گریزندگی بالای اکسیژن، طبق واکنش زیر به وجود آمده است [۴] :

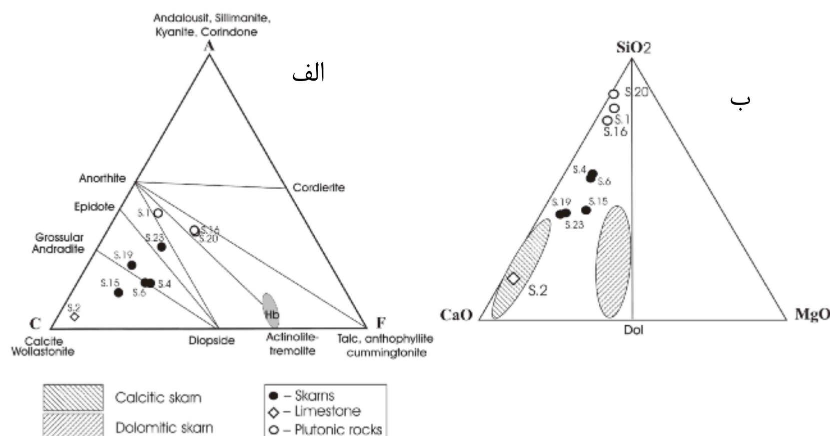


(5) $3CaCO_3 + 3SiO_2 + Fe_2O_3 \rightarrow Ca_3Fe^{3+}{}_2(SiO_4)_3 + 3CO_2$

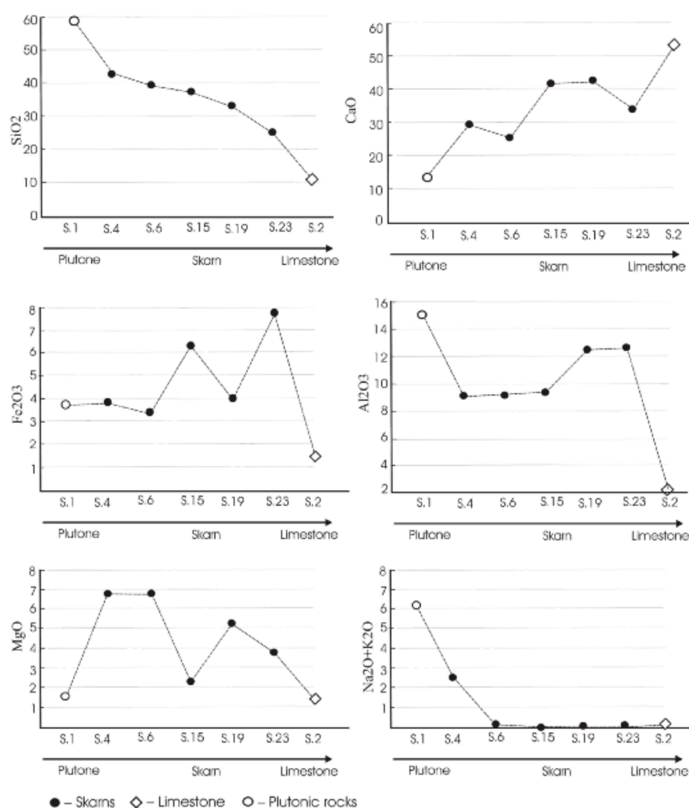
واکنش‌های احتمالی تشکیل دیوپسید: با توجه به اینکه سنگ اولیه آهک دولومیتی بوده، تبلور دیوپسید را می‌توان از طریق واکنش زیر توجیه کرد:



(6) $MgCa(CO_3)_2 + 2SiO_2 \rightarrow MgCa(SiO_2O_6) + 2CO_2$



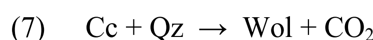
شکل ۹ (الف) : نمودار ACF [۴،۳] نمایانگر پاراژنزهای دگرگونی متوسط و قوی. نمودار ب) نشان می‌دهد که نمونه‌های اسکارن، در مقایسه با سنگ آهک دگرگون نشده (S.2)، از توده آذرین سیلیس گرفته‌اند. به علت اینکه دمای دگرگونی از ۶۰۰ درجه سانتیگراد بالاتر نرفته، به جای آنورتیت، گروسولار و کوارتز در نمونه‌های S.23 و S.19 حضور پیدا کرده‌اند.



شکل ۱۰ تغییرات عناصر اصلی در اسکارن کرمان و مقایسه آن با سنگ آهکی دگرگون نشده و سنگ آذرین مجاور.

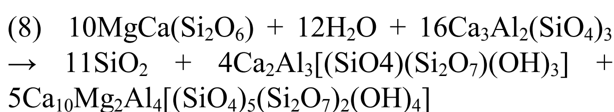
در شکل۱۱ الف، منحنی این واکنش به صورت نمودار Pf - XCO_2 نشان داده شده [۵]. در این نمودار، سه منحنی برای مقادیر $XCO_2 = 0.1, 0.5 , 1$ رسم شده است. شیب این منحنی‌ها مثبت بوده، کاهش XCO_2 و فشارکلی سیال موجب کاهش دمای واکنش‌ها و تبلور دیوپسید و ولاستونیت می‌گردد. به طوری که از این نمودار برمی‌آید در فشار سیال برابر با کمتراز یک کیلوبار (نیمه آتشفشانی) و XCO_2 برابربا ۰/۵ (در آغاز دگرگونی مجاورتی)، حداقل دمای تبلور دیوپسید و ولاستونیت به ترتیب ۴۲۰ و ۴۷۰ درجه سانتیگراد است.

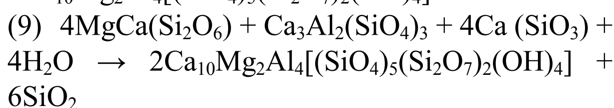
واکنش‌های تبلور ولاستونیت: معمول‌ترین واکنش‌هایی که برای تبلور ولاستونیت ارائه شده [۶]، واکنش زیر است:


(7) $Cc + Qz \rightarrow Wol + CO_2$

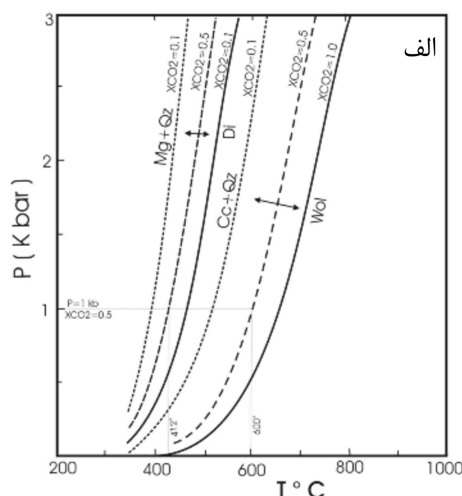
همان‌طور که از نمودار شکل۱۰- a برداشت می‌شود، در صورتی که ۱= XCO_2 باشد دمای بسیار بالایی لازم است تا کلسیت با کوارتز واکنش دهد. با ورود آب از توده نفوذی به سنگ آهک، XCO_2 کاهش پیدا می‌کند و دمای تبلور ولاستونیت پائین می‌آید. پس‌از تبلور مقداری آهک سیلیکات، XCO_2 دوباره در محیط بالا می‌رود و واکنش‌ها متوقف می‌گردند. بنابراین امکان دارد مجموعه کلسیت + کوارتز تا حرارت‌های بسیار بالا پایدار باقی بماند.

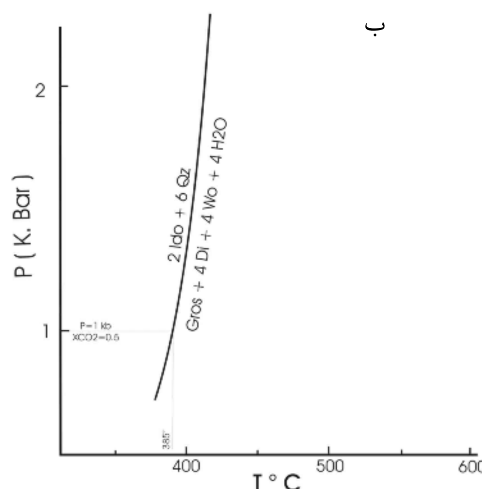
واکنش‌های تشکیل ایدوکراز: ایدوکراز غالباً در دگرگونی مجاورتی و درسنگ‌های غنی از کلسیم یافت می‌شود. چگونگی تشکیل این کانی بسیار پیچیده است [۷]. به عقیده [۸] ایدوکراز در فشار۱ تا ۲ کیلو بار و دماهای ۴۵۰ تا۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌گردد (شکل ۱۱-ب). تبلور این کانی با افزایش فشار بخارآب نسبت مستقیم و با XCO_2 نسبت معکوس دارد. در صورتی که XCO_2 به بیش از ۰/۵ برسد ایدوکراز به ولاستونیت، گروسولار و دیوپسید تبدیل می‌گردد. در مبحث سنگ نگاری اسکارن گفته شد هرگاه در یک نمونه ایدوکراز ظاهر می‌شود، گارنت و دیوپسید ناپدید می‌گردند و یا مقدار آن‌ها ناچیز است. این امر نشان می‌دهد که در واکنش تبلور ایدوکراز، گارنت و دیوپسید اعضاء شرکت کننده در واکنش هستند. به علاوه، کلسیت نیز غالباً با گارنت و ایدوکراز همراه است. با توجه به این مشاهدات تشکیل ایدوکراز را می‌توان به واکنش‌های [۹] که در زیر آمده‌اند نسبت داد:


(8) $10MgCa(Si_2O_6) + 12H_2O + 16Ca_3Al_2(SiO_4)_3 \rightarrow 11SiO_2 + 4Ca_2Al_3[(SiO4)(Si_2O_7)(OH)_3] + 5Ca_{10}Mg_2Al_4[(SiO_4)_5(Si_2O_7)_2(OH)_4]$


(9) $4MgCa(Si_2O_6) + Ca_3Al_2(SiO_4)_3 + 4Ca\ (SiO_3) + 4H_2O \rightarrow 2Ca_{10}Mg_2Al_4[(SiO_4)_5(Si_2O_7)_2(OH)_4] + 6SiO_2$

ایدوکراز در اسکارن‌های کوه صاحب‌الزمان، در آخرین مرحله تکوین اسکارن، ازطریق واکنش‌های فوق و درطی دگرگونی برگشتی، زمانی‌که به علت انجماد توده آذرین ورود آب به سنگ درونگیر افزایش پیداکرده، تشکیل شده است.





شکل ۱۱ الف: نمودار فشار- دما در مقادیر مختلف XCO_2 برای تبلور ولاستونیت و دیوپسید [۵]، ب : نمودار فشار- دما با XCO_2 پائین تراز ۰/۵ برای تبلور ایدوکراز [۸].

بحث و بررسی

تغییرات شیمیایی نمونه‌های اسکارن برروی نمودارها از پدیده انتشار حکایت می‌کند بدین ترتیب که اختلاف پتانسیل شیمیایی توده نفوذی و سنگ آهک سبب شده تا SiO_2 و Fe_2O_3از توده آذرین به طرف سنگ آهک و CaO به سمت توده‌ی نفوذی انتشار یابد. در سنگ‌های آذرین کوه صاحب‌الزمان درصد آنورتیت در پلاژیوکلازهای مجاور اسکارن، نسبت به بخش درونی توده، بالاتر نرفته و نیز آندواسکارن به وجود نیامده [۲] بنابراین، پدیده انتشار تقریباً یک‌طرفه و از توده آذرین به سمت سنگ آهک بوده است. سیلیس بیشترین جابجایی را داشته و در واقع عامل اصلی دگرنهادی به حساب می‌آید. بعد از سیلیس، آهن به میزان کمتر، از توده آذرین به طرف سنگ‌آهک انتشار یافته و باعث تبلور آندرادیت شده‌است. این عناصر توسط بخارآب بسیارداغ به سنگ درونگیر منتشر شده‌اند بنابراین فرایند تشکیل اسکارن پدیده تراوش بوده است. زمین دما- فشارسنجی گارنت- کلینوپیروکسن اسکارن‌ها دمای ۵۸۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد و فشار حدود ۲ کیلوبار به دست داده است [۲]. با توجه به اینکه حداکثر ضخامت سربار توده آذرین در زمان جایگزینی (ضخامت رسوب‌های کرتاسه قبل از فرسایش)، حدود ۸۰۰ متر بوده، فشارهای ۲ تا ۲/۵ کیلوبار به دست آمده از طریق زمین فشار سنجی، معرف فشار سیال است نه وزن سربار. براساس تجارب آزمایشگاهی [۵] در فشار سیال کمتراز یک کیلوبار (نیمه آتشفشانی) و XCO_2 برابربا ۰/۵ (در آغاز تبلور) دمای تبلور دیوپسید و ولاستونیت به ترتیب ۴۳۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد است. با توجه به اینکه دمای ماگماهای دیوریتی معمولاً حدود ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه است و حدود ۰/۶۵ تا ۰/۷ این دما به سنگ مماس با توده منتقل می‌گردد بنابراین دمای هاله اسکارن می‌توانسته به ۶۰۰ درجه سانتگراد برسد و این دما برای تبلور دیوپسید به طورکامل و ولاستونیت به صورت جزئی، کافی بوده است. به علت اینکه دمای دگرگونی از۶۰۰ درجه سانتیگراد بالاتر نرفته، آنورتیت (به جای گروسولار + کوارتز) درنمونه های اسکارن متبلور نشده و مقدار ولاستونیت در نمونه‌ها ناچیز است.

برداشت

در دامنه غربی کوه صاحب الزمان، در شرق شهر کرمان، چند بیرون زدگی کوچک به قطر ۱۵ تا ۵۰ متری از یک توده گرانیتوئید در سنگ‌های آهکی کرتاسه نفوذ کرده و هاله‌های کم‌ضخامت اسکارن ساخته‌اند. فاسیس‌های اسکارن کوه صاحب‌الزمان کرمان، به ترتیب افزایش نسبی شدت دگرگونی، عبارتنداز: کلریت-اپیدوت- گارنت اسکارن، ایدوکراز- گارنت اسکارن، ایدوکراز اسکارن، گارنت-ولاستونیت اسکارن، دیوپسید- ایدوکراز- ولاستونیت اسکارن، دیوپسید- ولاستونیت- گارنت اسکارن. کانی‌های اصلی اسکارن عبارتنداز اپیدوت، گارنت (گروسولر- آندرادیت)، دیوپسید، ولاستونیت، ایدوکراز، کلسیت و کلریت. سنگ اولیه آهک مارنی کمی دولومیتی بوده و گریزندگی اکسیژن در زمان تشکیل اسکارن بالا بوده است. در این دگرنهادی SiO_2 و Fe_2O_3 از توده آذرین به طرف سنگ آهک و CaO به طرف سطح تماس انتشار یافته اما کلسیم به درون توده آذرین راه نیافته و آندواسکارن به وجود نیامده است. سیلیس بیشترین جابجایی را داشته و در واقع عامل اصلی دگرنهادی به حساب می‌آید. بعد از سیلیس، آهن به میزان کمتر، از توده‌ی آذرین به سمت سنگ‌آهک انتشار یافته و باعث تبلور آندرادیت شده است. این عناصر توسط بخارآب بسیار داغ به سنگ درونگیر منتشر شده‌اند بنابراین فرایند تشکیل اسکارن پدیده تراوش بوده است. براساس داده های سنگ نگاری، دو رخساره آلبیت-اپیدوت-هورنفلس و هورنبلندهورنفلس در اسکارن‌های کرمان مشاهده شده‌اند: مجموعه کانیایی ولاستونیت- دیوپسید- گارنت را می‌توان به رخساره هورنبلندهورنفلس نسبت داد و مجموعه کانیایی کلریت - اپیدوت- ایدوکراز را در ردیف رخساره‌ی آلبیت- اپیدوت‌هورنفلس به حساب آورد.

قدردانی

این مقاله چکیده‌ی پایان نامه کارشناسی ارشد پترولوژی است که در دانشگاه خوارزمی به‌ثمر رسیده بنابراین وظیفه‌ی خود می‌دانیم از معاونت محترم پژوهشی، معاونت محترم اداری و مالی، ریاست محترم دانشکده زمین‌شناسی و مدیریت محترم

گروه زمین‌شناسی آن دانشگاه تشکر کنیم. همچنین از آقای مهندس علی دوستی بخاطر انجام آنالیزهای شیمیائی سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Huckriede R.M., Kursten M., venzalff H., *"Zur geologic des Gebietes zwischen kerman and sagand"*,(Iran) :Bei.Geol. Jahrb.,V.15, (1962), 197p.

[۲] دهقانی س.، *"پتروگرافی، پترولوژی و ژئوشیمی اسکارن کوه صاحب‌الزمان کرمان"*، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه خوارزمی، تهران (۱۳۹۱).

[3] Miyashiro A., *"Volcanic rocks series in Island arces and active continental margine"*, Am. Jour. Sci., (1974), 274p.

[4] Winkler H.G.F., *"Petrogenesis of Metamorphic Rocks"*, 4 th Ed. Springer-Verlag, New York (1976).

[5] Shimazaki H., *"The Sasano hastingsit-bearing copper skarn deposit formed in aluminous sediment at the Yoshioko Mine"*, Japan: Econ. Geol., (1982), 75p.

[6] Tracy R.J., Frost B.R., *"Phase equilibria and thermobarometery of calcareous, ultramafic and mafic rocks"*, and iron formation. In Contact Metamorphism (Kerrick, D.M., ed.) Mineralogical Society of American, Rewiews in Mineralogy, (1991), 26p.

[7] Hochella M.F., Liou J.G., Keshinen M.J., Kim H.S., *"Synthesis and stability relations of magnesium idocrase"*, Econ. Geol., (1982), 77p.

[8] Spear F. S., *"Metamorphic phase equiliberia and pressure-temperature-time paths"*, Mineralogical Society of America, (1993).

[9] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., *"An introduction to the rock forming minerals"*, seventeenth impression, Longman, (1991), p. 528.